中国生态农业学报 2016 年 8 月 第 24 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2016, 24(8): 995−1004

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160162

环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究*

张喜英 刘小京 陈素英 孙宏勇 邵立威 牛君仿

(中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022)

摘 要 淡水资源严重匮乏是影响环渤海低平原粮食生产可持续发展的重要限制因素。本文针对该区粮食生产中水分利用效率低、提升潜力巨大，同时该区浅层微咸水资源和降水资源较丰富的现状，以中国科学院南皮生态农业试验站最近 3 年试验研究结果为基础，综述了在挖掘咸水利用潜力、提高雨水和灌溉水利用效率方面研究工作进展。针对冬小麦夏玉米一年两作种植，研究结果显示品种间产量和水分利用效率(WUE)差异显著，最高和最低品种差异达 20%左右，通过选用节水高产品种可显著提升产量和 WUE；冬小麦通过拔节期灌溉关键水，在促进地上部生物量积累同时，显著促进地下根系生长，使冬小麦充分利用土壤储水，实现限水灌溉下稳产高效；夏玉米通过缩小行距增大株距的缩行匀播，可提升夏玉米苗期单株作物根系所占土壤体积空间，增加水分养分对作物的有效性，提高夏玉米成苗率和苗期所截获辐射量，比常规种植产量提高 10%左右；冬小麦在拔节期利用含盐量不大于 4 $g\cdot L^{-1}$ 的浅层微咸水替代淡水灌溉，产量与淡水灌溉相同；浅层微咸水替代淡水灌溉并配套土壤有机质提升技术和利用夏季降水淋盐，可实现微咸水灌溉下周年土壤盐分平衡。通过上述措施实施，实现以咸补淡、以淡调盐、多水源互补高效利用，在不影响作物产量条件下可节约深层淡水资源，促进区域灌溉农业可持续发展。

关键词 小麦−玉米一年两熟 淡水 微咸水 雨水 水分利用效率 产量
中图分类号: S273.1; S274.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)08-0995-10

Efficient utilization of various water sources in farmlands in the low plain nearby Bohai Sea*

ZHANG Xiying, LIU Xiaojing, CHEN Suying, SUN Hongyong, SHAO Liwei, NIU Junfang

(Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Laboratory of Water-saving Agriculture / Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract Freshwater shortage is a growing crisis in food production in the plain nearby the Bohai Sea. It is therefore important to efficiently utilize available water resources in the region, including fresh groundwater, brackish groundwater and precipitation during grain production season. This paper summarized the work of a 3-year field experiment at Nanpi Eco-Agricultural Experimental Station, Chinese Academy of Sciences on utilization of saline water in replace of fresh groundwater irrigation of winter wheat, deficit irrigation to reduce water use, high-performance cultivars, and the optimized planting and cultivation technologies in wheat-maize double cropping system. The results showed that jointing stage was critical for irrigation under a single irrigation application in winter wheat. Irrigation at jointing stage improved the growth of both aboveground and belowground parts of winter wheat. The enhanced root growth increased soil water utilization during late growth stages and also reduced the negative effects of water stress on yield under limited irrigation of winter wheat. The

* 国家科技支撑计划项目(2013BAD05B02, 2013BAD05B05)和河北省渤海粮仓科技示范工程专项资助
张喜英，主要从事农田节水机理和技术研究。E-mail: xyzhang@sjziam.ac.cn
收稿日期: 2016−02−21 接受日期: 2016−04−27

* This research was supported by the National Key Technology Research and Development Program of China (2013BAD05B02, 2013BAD05B05) and Hebei S&T Special Fund for "Bohai Granary" Project.
Corresponding author, ZHANG Xiying, E-mail: xyzhang@sjziam.ac.cn
Received Feb. 21, 2016; accepted Apr. 27, 2016

study also showed that the use of saline water with salt concentration less than 4 g·L^{-1} in place of freshwater irrigation at jointing stage of winter wheat did not affect yield, and prevented deep freshwater depletion. To mitigate the negative effects of soil salt in the top 20 cm soil profile after winter wheat harvest on successive crops (summer maize), about 70 mm of irrigation at sowing stage of maize was needed to support maize germination and seedling establishment. The results suggested that the return of the straw of both crops to the soil enhanced soil organic content. While the increased proportion of stable soil aggregates benefited the stability of soil structure, leaching of salt after saline irrigation improved during summer rainy season. The selection of better cultivars of winter wheat and summer maize had the potential to improve yield and water use efficiency by up to 20%. For summer maize, reducing inter-row spacing and increasing intra-row spacing improved the proportion of seedling establishment and interception ratio of solar radiation by crop canopy at seedling stage. This improved maize yield by about 10% compared with traditional planting. The combined results of the measures reduced freshwater use in irrigation, and significantly improved water use efficiency and grain yield of crops. The study showed that it was possible to maintain grain yield and to conserve fresh groundwater resources at the same time in the study area.

Keywords Winter wheat-summer maize double cropping system; Freshwater; Saline water; Precipitation; Water use efficiency; Crop yield

水资源危机是人类面临的最严重挑战之一。目前全球水资源的 70%用于农业生产，未来随着工业发展和城市化，农业可供水量逐渐减少；而另一方面，人口的增加需要更多的粮食。如何解决水资源不足和粮食生产的矛盾，成为世界范围关注的焦点[1]。环渤海低平原是我国重要的农产品生产地区，在保障国家粮食安全中占有重要地位。但该区是我国水资源极为短缺地区之一，人均和平均单位耕地面积占有水资源量仅为 190 m^3·人$^{-1}$和 1 650 m^3·hm^{-2}，分别是全国的 1/12 和 1/16，粮食生产长期依靠抽提深层地下水来实现，导致该区地下水位持续下降，形成了世界上最大的地下水漏斗区，并引起一系列的环境问题。另一方面该区由于受自然和社会经济等因素影响，粮食生产水分利用效率低，具有很大的提升潜力。同时该区拥有可更新的浅层微咸水资源，目前利用率不足 40%[2]，充分安全高效利用微咸水资源是解决该区粮食生产水资源需求的重要途径。另外，环渤海低平原是降雨相对丰富地区，年降水量 450~600 mm，进一步提高雨水资源利用效率也是解决该区淡水资源短缺的一个重要途径。因此，针对环渤海区粮食生产中淡水资源极度短缺，水分利用效率低、提升潜力巨大，同时该区浅层微咸水资源和降水资源较丰富的现状，开展以挖掘咸水利用潜力、提高地下淡水与雨水利用效率、实现以咸补淡、以淡调盐、多水源互补高效利用，在不增加或者降低区域农业淡水资源用量条件下，实现粮食增产，可为环渤海中低产区增粮工程的实施提供水资源保障。本文总结了近几年在中国科学院南皮生态农业试验站(以下简称“南皮试验站”)开展的多水源高效利用研究结果，以期为区域多水源高效利用技术研究与应用提供参考和借鉴。

1 提高农田水分利用效率

“让每一滴水生产出更多的粮食”，通过提高农业水资源利用效率解决全球缺水问题是各国科学家形成的共识[3]。作物耗水在田间，通过各种农艺节水措施，提高自然降水和灌溉水利用效率，是农田节水的重要方面。根据研究，目前世界范围三大主要作物水稻、小麦、玉米的平均水分生产效率分别为 1.09 kg·m^{-3}、1.09 kg·m^{-3}和 1.80 kg·m^{-3}，而目前 3 种作物水分利用效率优化水平可达 1.60 kg·m^{-3}、1.70 kg·m^{-3}和 2.70 kg·m^{-3}，具有巨大的提升潜力[4]。也可以看出通过提高水分利用效率、发展高效用水农业对解决全球缺水问题的重要性。

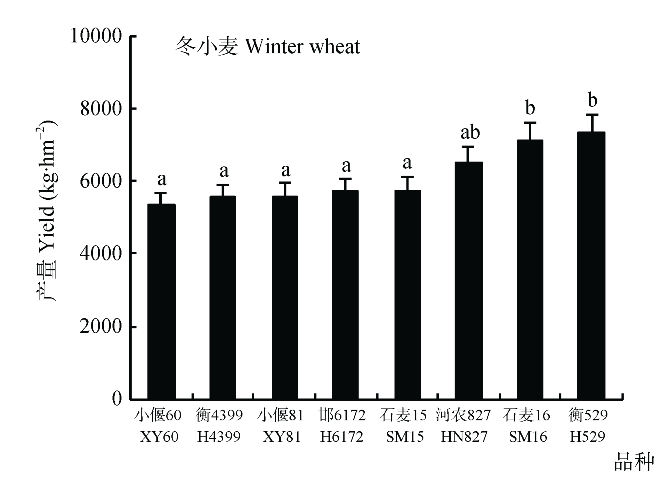
根据河北省 2011 年统计年鉴，河北低平原目前冬小麦产量平均为 5 569.5 kg·hm^{-2}、玉米产量平均为 6 468 kg·hm^{-2}。根据灌溉定额和生育期降水量以及冬小麦和夏玉米对土壤水分的利用能力差异，冬小麦季平均耗水量 420 mm，夏玉米季平均耗水量 380 mm，现状水分利用效率分别为 1.33 kg·m^{-3} 和 1.70 kg·m^{-3}；如果维持现状耗水量不变，水分利用效率提升到现在山前平原高产水平的平均水分利用效率 1.50 kg·m^{-3}和 2.00 kg·m^{-3}，可实现冬小麦和夏玉米增产 730.5 kg·hm^{-2}和 1 132.5 kg·hm^{-2}，年增产能力 1 863 kg·hm^{-2}。根据低平原现状冬小麦和夏玉米灌溉种植面积 97.04 万 hm^{2}和 86.99 万 hm^{2}计算，在不增加耗水条件下，年增产能力 16.9 亿 kg。增产节水效果相当于节约水资源 11.1 亿 m^3。如果进一步改善农田灌溉条件、配套高产高效栽培技术，实现目前冬小麦和夏玉米较高的水分利用效率水平(分别为 1.70 kg·m^{-3}和 2.20 kg·m^{-3})，可进一步降低农田耗水 40 mm·a^{-1}，实现冬小麦和夏玉米增产

1 231.5 kg·hm^{-2}和 1 452 kg·hm^{-2}, 年单位面积增产能力 2 683.5 kg·hm^{-2}, 年增产能力 16.9 亿 kg, 降低农田灌溉用水量 3.68 亿 m^3。增产节水效果相当于节约淡水资源 16.4 亿 m^3。上述结果显示提升农田水分利用效率对区域节水农业的重要性。

1.1 选用节水高产品种提高产量和水分利用效率(WUE)

生物节水是利用生物自身的生理遗传潜力, 在相同水分条件下, 获得更多的农业产出[5–6]。很多研究表明, 不同作物利用同样水分所生产的干物质(水分利用效率)不同, 同一作物不同品种之间的水分利用效率也存在明显差异。农田水分利用效率(WUE)可定义为: WUE=(生物量×收获指数)/农田耗水量。提升 WUE 通过 3 个途径: 增加生物量、增加收获指数、降低农田耗水量[7]。作物收获指数和生物量增加与品种遗传改良和农田作物生长条件改善关系密切。Zhang 等[8]研究了河北平原不同年代大面积推广的冬小麦品种种植在现代同样条件下产量和耗水在 3 个灌溉制度下的表现, 在耗水量维持稳定条件下, 现在的冬小麦品种比过去品种产量增加明显, WUE 也得到改善, 品种改良带来平均每年 1%产量增加和 0.5%水分利用效率提升, 研究发现品种水分利用效率提高与其生育进程加快、收获指数提高密切相关。

不仅不同年代品种水分利用效率差异明显, 现代品种间也存在着产量和 WUE 的显著差异。Zhang 等[9]研究发现现代冬小麦夏玉米产量高的品种也具有高的水分利用效率, 筛选高产品种的过程也是提升农田水分利用效率的过程。如图 1 显示在南皮试验站进行的冬小麦和夏玉米品种对比试验(2014—2015 年), 最高和最低品种产量差异可达 28%。因此, 选用高产品种对提高产量和 WUE 的重要性。但不同品种不同年份产量表现存在差异, 与天气条件出现的年际波动有关。Zhang 等[10]研究结果显示在气候变化背景下, 进入 21 世纪后天气因素驱动的产量比 20 世纪 80 年代平均低 10%左右, 表明天气条件改变越来越不利于河北主要作物产量形成, 使作物产量和 WUE 潜力不能充分发挥。不利天气条件表现在日温度变化中最低温度升高幅度大于最高温度升高幅度, 导致日较差变小及风速、日照时数都有明显降低趋势。伴随冬小麦夏玉米两个作物生育期平均温度升高同时, 极端温度出现概率增加, 主要表现在玉米灌浆后期急剧降温发生概率增大, 影响灌浆成熟; 冬小麦生育期春季温度波动幅度大、灌浆后期升温速度快、易发生干热风等不利天气条件。因此, 需要针对目前气候变化背景下冬小麦夏玉米生育期生长条件发生的改变, 选用适应气候变化的新品种, 充分发挥作物生物节水和增产潜力。



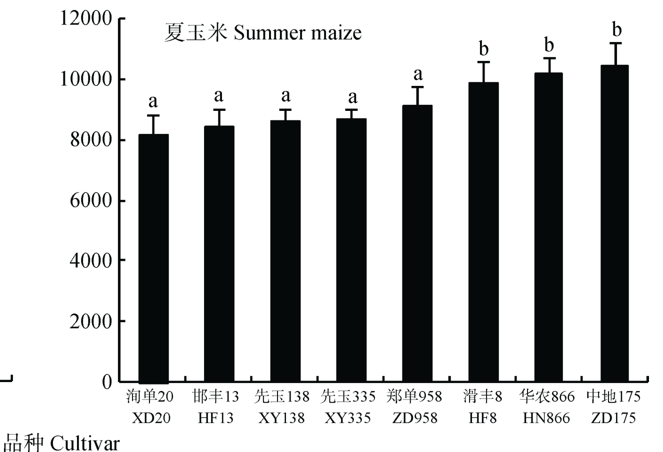


图 1　冬小麦和夏玉米在相同种植条件下不同品种的产量差异(2014—2015 年, 中国科学院南皮生态农业试验站)
Fig. 1　Yield difference among different cultivars of winter wheat and summer maize (2014–2015, Nanpi Eco-Agriculture Station, CAS)
不同字母表现差异显著(P<0.05)。Different letters for the yield indicated significant difference at $P < 0.05$.

1.2 冬小麦优化灌溉制度

随着水资源短缺加剧, 灌溉制度已经从充分灌溉向节水型灌溉转变, 例如限水灌溉(limited irrigation)、非充分灌溉(non-full irrigation)与调亏灌溉(regulated deficit irrigation)等[11], 对由传统的丰水高产型灌溉转向节水优产型灌溉, 提高 WUE 起到了积极作用。很多研究显示作物生理生态指标对土壤水分有一个明显的阈值反应, 当土壤含水量在一定范围之上时, 含水量的降低对作物一些生理生态指标不产生影响。对于环渤海区域主要作物冬小麦, 灌浆期短, 灌浆后期容易受干热风影响, 使产量潜力不能充分发挥, 适度水分亏缺条件下冬小麦生长

发育过程提前，灌浆期适度延长，更有利于花后干物质积累和向籽粒产量的转移，最终提高作物收获指数[12]。表 1 是 2012—2015 年 3 个生长季在南皮试验站进行的冬小麦生育期灌溉试验结果，3 个生长季节降水属于常年水平，灌溉 2 次水产量达到最高，随着灌溉次数增多，产量不再增加，甚至出现降低。WUE 则随灌溉次数增加而呈现降低趋势。平均 3 个生长季，冬小麦从不灌溉增加一次拔节水增产 30.7%，在拔节水基础上增加 1 次灌溉的增产率为 5.7%；而再增加 1 次水出现 2.5%的减产。从旱作到 1 水、1 水到 2 水、2 水到 3 水 WUE 平均降低 2.2%、3.5%和 14.8%。上述结果显示冬小麦多数年份灌溉 1~2 次水就能获得较高产量和 WUE。表 1 结果也显示冬小麦年际产量变异较大，2013—2014 季降水量与 2014—2015 季降水量相近，但 2013—2014 季最高产量比 2014—2015 季最高产量高 17%，显示出冬小麦产量不仅受灌溉影响，天气条件对冬小麦产量形成也有显著影响。

表 1 冬小麦 2012—2015 年 3 个生育期降水量、不同灌溉制度下产量和水分利用效率(WUE)
(中国科学院南皮生态农业试验站)

Table 1 The growing season rainfall, yield, water use efficiency (WUE) under different irrigation schedulings for winter wheat during 2012–2015 in Nanpi Eco-Agricultural Experimental Station, CAS

灌溉时期(次数) Irrigation treatment	2012—2013		2013—2014		2014—2015	
	产量 Yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	WUE ($kg \cdot m^{-3}$)	产量 Yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	WUE ($kg \cdot m^{-3}$)	产量 Yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	WUE ($kg \cdot m^{-3}$)
旱作(0 次) Rain-fed	4 591.5a	1.98c	6 468.0a	2.19a	4 624.5a	2.02b
拔节期(1 次) One irrigation at jointing stage	6 481.5b	1.90bc	7 728.0b	2.18a	6 081.0b	1.96b
拔节+扬花(2 次) Two irrigations at jointing and flowering stages	6 891.0c	1.82b	7 825.5b	2.12a	6 652.5c	1.80ab
起身+抽穗+灌浆(3 次) Three irrigations at recovery, heading and grain-fill stages	6 528.0b	1.48a	7 759.5b	1.89b	6 555.0c	1.73a
生育期降水量 Rainfall during the whole growth stage (mm)	108.0		125.1		123.9	

同列数字后字母不同代表处理间差异显著(P<0.05)。Different letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$.

环渤海低平原位于季风气候区，降雨主要集中在夏季，冬小麦生长期(10 月—翌年 6 月)的降雨量远远低于作物需水量，合理灌溉不仅有助于根系对土壤水分的有效利用，而且对提高冬小麦 WUE 具有重要作用。冬小麦在返青以前，对土壤水分吸收主要集中在 80 cm 以上的土层，随着拔节—开花期间根系迅速生长，根系对 80 cm 以下土层的水分利用增加，特别是到灌浆期，灌水少的冬小麦主要依靠中下层土壤储水来维持蒸腾。南皮试验站 3 个生长季的试验发现，在不灌溉到灌溉 3 水条件下，冬小麦对土壤储水消耗占生育期蒸散比例分别为 52.3%、43.4%、30.4%和 19.4%。土壤储水利用对限水灌溉冬小麦稳产高效有重要作用。研究发现当根长密度低于 0.8 $cm \cdot cm^{-3}$ 时，根系就成为影响作物充分吸收土壤水分的限制因子。深层根系不足限制了作物对深层土壤储水的吸收利用。Zhang 等[13]研究结果显示，冬小麦在限水灌溉条件下，其营养生长阶段需要一定水分供应，才能形成一定的生物量，同时也可以促进地下部分根系形成，为灌浆期充分利用土壤储水打好基础，因而这个阶段蒸散量的多少对最终产量影响明显。如果营养生长阶段水分条件差，作物地上部分生长发育受到影响，进而地下部分根系生长较少，使作物不能充分利用深层土壤储水，最终影响限水灌溉下冬小麦产量。因此，冬小麦高效用水模式应根据降水条件，通过灌溉调控营养生长、促进地下部分生长、生殖生长阶段充分利用土壤储水来实现。据此提出冬小麦限水灌溉下最佳灌溉时期是拔节期，这个时期的灌溉不仅促进地上部分生长，也促进地下根系部分生长，为冬小麦生育后期利用土壤储水创造了条件。

1.3 配套栽培种植措施提高玉米产量和 WUE

通过配套栽培措施提高作物产量是促进作物水分利用效率提高的一个重要方面。不同作物和品种对环境的要求和适应力都有一系列的生理生态和形态差异，只有环境与作物品种的生理生态和遗传特性相适应，才能充分发挥品种的特性与产量潜力，合理利用资源，趋利避害，发挥资源增产优势。很多研究显示夏玉米生育期光照与产量有显著正相关关系[14]，而目前河北低平原面临着夏玉米生长期光照条件变差趋势，如图 2 显示，从 20 世纪 50 年代到现在，平均每年日照时数降低 4.9 h，已经从原来的平均 1 000 h 降低到现在的平均 700 h，因此夏玉米生长期间充分利用光能资源是其高产高效的重要途径。

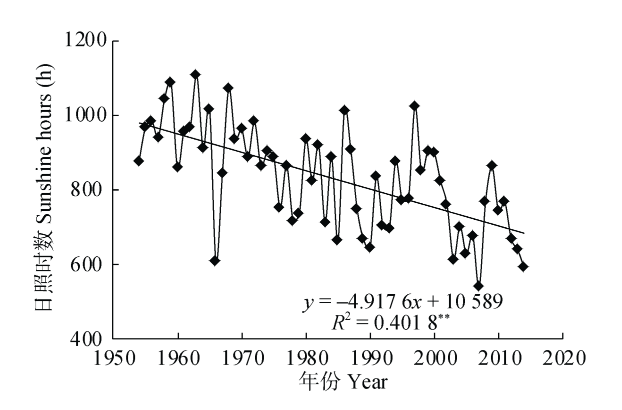


图 2　20 世纪 50 年以来夏玉米生长期间日照时数的变化趋势(沧州)

Fig. 2　The changes in total sunshine hours during the growing season of summer maize from 1950s to present at Cangzhou site

另一方面在环渤海低平原冬小麦夏玉米一年两作区，夏玉米生育期较短，通过延迟收获和提早播种可实现夏玉米生育期延长，提高夏玉米生育期截获的辐射资源量，最终提高产量。根据南皮试验站研究结果，夏玉米从 9 月 22 日延迟到 9 月 30 日收获，平均百粒重可增加 10%左右；而在玉米灌浆成熟期单位耗水的水分利用效率为 2.5~4 $kg \cdot m^{-3}$，远大于玉米整个生育期的水分利用效率 2.0 $kg \cdot m^{-3}$。因此，延迟玉米收获不仅增加玉米产量，也可以提高玉米整个生育期水分利用效率。但在气候变化背景下，玉米成熟期温度波动大，9 月底经常出现降温现象，气温低于玉米灌浆所需要的日平均温度而使玉米灌浆提前停止，不能实现通过延迟收获期增产目的，需要与玉米提前播种延长生育期的策略相结合。

夏玉米播种密度及其株行距排列影响玉米冠层空间结构和根系的空间分布，从而影响作物对光能截获以及土壤水分养分对作物的有效性，对夏玉米产量和 WUE 产生重要影响[15]。南皮试验站的研究发现，同样播种密度 67 500 株·hm^{-2} 下，20 cm–100 cm 和 40 cm–80 cm 大小行、60 cm–60 cm 等行距、38 cm 匀播对夏玉米苗期同样种植密度下根系所占体积、冠层结构和冠层截光率产生影响。根系取样结果显示宽窄行 20 cm–100 cm 播种下两株玉米表层根系存在竞争关系，而通过缩小行距增大株距方式，也就是增加玉米在空间分布的均匀度可增加单株玉米根系所占土壤体积，提高单株玉米所能接触的土壤水分和养分，增强土壤水分养分对作物的有效性，降低相邻两株玉米的竞争关系。在苗期玉米易发生干旱条件下，匀播玉米单株所获得的土壤水分显著高于宽窄行玉米，成苗率提高 10%~15%(图 3)；同时匀播条件下玉米苗期截获的光合有效辐射比例高于宽窄行，前者比后者高 20%，显著提升了光能利用效率。研究结果显示，通过缩行匀播增加玉米苗期光合有效辐射截获能力、土壤水分养分对作物的有效性而提升成苗率和苗期生长速度，可使夏玉米产量和水分利用效率显著提升。研究结果也充分说明优化种植栽培管理对发挥玉米增产增效潜力的作用。

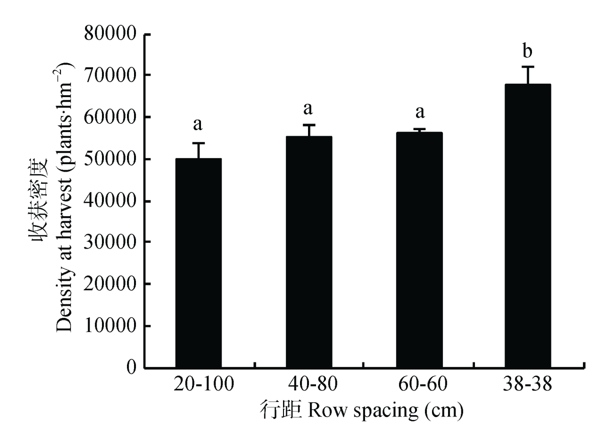


图 3　相同种植密度不同行距夏玉米收获期密度比较(2015 年中国科学院南皮生态农业站)

Fig. 3　The effects of row spacing on the seedling establishment of maize (2015, Nanpi Eco-Agricultural Experimental Station, Chinese Academy of Sciences)

20 cm-100 cm 和 40 cm-80 cm 分别代表宽窄行种植，60 cm-60 cm 代表 60 cm 等行距播种，38 cm-38 cm 代表株行距都为 38 cm 的匀播。20 cm-100 cm and 40 cm-80 cm indicate narrow and wide row spacing, 60 cm-60 cm represents equal row spacing at 60 cm, 38 cm-38 cm represents the inter and intra row spacing being all 38 cm as uniform planting.

2　提高雨水资源利用效率

在淡水资源匮乏地区，通过农田耕作覆盖措施，充分蓄积雨水资源，减少对灌溉水的依赖是提升限水灌溉作物产量的一个重要途径[16]。纳雨蓄墒耕作技术主要包括深耕、深松保墒、耙耱和镇压、保护性耕作技术等。保护性耕作方式改传统的精耕细作对土壤的过度加工为少耕或免耕，同时采用秸秆、残茬或其他植被覆盖地表以减少雨水和风对土壤侵蚀，降低蒸发；免耕最大限度地减少了土壤物理结构的破坏，提高保墒性能，降低了土壤水分的蒸发量，增产增收效果明显。土壤深松可打破犁底层，加深耕层疏松土壤厚度，增强对雨水的蓄纳能力，并促进作物根系对土壤深层水分的吸收，减少对土壤表层水分的过渡依赖[17]。耙耱和镇压保墒技术主要是通过碎土、平地及压紧土壤表层，以减少表土层内的大孔隙，减少土壤水分蒸发，达到保墒目的。

环渤海低平原冬小麦和夏玉米一年两作的种植制度，富集了大量作物秸秆，作物秸秆和残茬覆盖还田具有成本低、保墒土壤、调节地温和培肥地力等优

点，也是作物秸秆综合利用的最好途径。研究发现冬小麦收获后秸秆还田直接覆盖夏玉米，可减少夏玉米生育期30~40 mm土壤蒸发[18]，这部分水分可蓄积在土壤中，为下季作物冬小麦所利用。冬小麦生长季节在限水灌溉下 40%~50%耗水来自于土壤储水消耗[12]。因此，通过秸秆覆盖夏玉米，可充分蓄积雨季降水，减少农田无效水分损失，对降低小麦玉米一年两作农田灌溉水消耗有重要意义。但夏玉米秸秆覆盖冬小麦，冬季具有提高土壤温度作用，但春季影响地温回升，使冬小麦生育期推迟，易造成冬小麦贪青晚熟，影响粒重，不利于冬小麦产量和WUE提高[19]。

地膜覆盖可以隔断土壤与大气间的水分交换，有效抑制土壤表面蒸发，提高地温，使作物成熟期提前，比秸秆覆盖更能抑制杂草生长。2013—2014冬小麦季进行平播膜上覆土和起垄沟播薄膜覆盖两种覆盖方式试验，不仅减少了棵间蒸发，起垄沟播薄膜也可以通过覆膜的垄蓄集小的降水，减少降水量少的雨水蒸发损失，增加降水资源对作物的有效性。如表2显示两种覆膜方式下冬小麦产量提高6%~10%、水分利用效率提高 10%~11%，节水增产效果明显。其中起垄沟播垄膜覆盖节水增产效果优于平播膜上覆土覆盖方式，前者可有效蓄积雨水，而后者可能存在膜上的土层和薄膜影响降水入渗至作物根部，虽然降低了土壤蒸发，但可能一定程度上消弱了降水对作物的有效性。地膜覆盖可能存在一定程度降低土壤肥力、没有及时清除的废旧薄膜污染土壤和环境等问题，在生产中需要使用新型可降解的环保地膜。

表2 薄膜覆盖对旱作冬小麦产量和水分利用效率(WUE)的影响(2013—2014，中国科学院南皮生态农业试验站)
Table 2 The effects of plastic film mulching on yield and water use efficiency (WUE) of winter wheat (2013–2014) in Nanpi Eco-Agricultural Experimental Station, Chinese Academy of Sciences

覆盖方式 Mulching way	降水 Precipitation (mm)	土壤储水利用 Soil water depletion (mm)	蒸散量 Evapotranspiration (mm)	产量 Yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	WUE ($kg \cdot m^{-3}$)	±%
膜上覆土 Flat mulch	102.2	221.9a	324.1a	6 948.0b	2.14b	10.1
起垄覆膜沟播 Ridge mulch	102.2	227.3a	329.5a	7 188.0b	2.18b	11.9
不覆盖(对照) Control	102.2	232.6a	334.8a	6 523.5a	1.95a	—

同列数字后字母不同代表差异显著(P<0.05)。Different letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$.

除高效利用农田雨水资源外，还可充分利用环渤海低平原坑塘蓄积雨季径流和外来水，增加可利用灌溉水源。这些坑塘一般是废弃窑窖、鱼塘和建设取土形成，据统计该区域坑塘总蓄水能力达 8 亿 m^3，夏季降水集中月份这些坑塘可拦蓄降水所产生径流的40%以上，为充分利用雨季雨洪资源提供了条件。例如南皮县田间地头大都有排水沟渠(坑塘)，这些坑塘大都相连，一方面在雨季可以蓄积雨水，另一方面蓄积调水，同时由于部分区域地下水位较浅，能保存一部分浅层地下水。这些坑塘积水在正常年份大都可以用来灌溉，特别是可用于冬小麦越冬水和返青拔节水灌溉，减少对地下水开采；或者在播种冬小麦时灌足底墒，把有限水资源储存于土壤中，减少水面蒸发损失。

3 挖掘浅层微咸水利用潜力

环渤海区域拥有较丰富的地下咸水资源，总储量在2 500亿 m^3(其中小于5 $g \cdot L^{-1}$的微咸水年可开采资源量占全国的1/2)。如河北低平原主要区域小于5 $g \cdot L^{-1}$的微咸水资源量有10.99亿 m^3(表3)，目前利用率为 40%[2]，有 60%微咸水资源可为农业所利用，为每公顷灌溉耕地增加近750 m^3灌溉水源。依据作物耐盐与需水规律，在作物生长一定阶段，利用微咸水进行补充灌溉，可实现替代淡水资源或增加作物供水实现作物增产目标[20]。环渤海低平原处于季风气候区，夏季降水集中，可利用夏季降水淋洗盐分，使土壤含盐控制在安全范围内。因此，通过充分挖掘和合理利用微咸水资源，是环渤海低平原粮食增产重要的水资源保障。

表3 河北低平原主要行政区多年平均微咸水资源量[2]
Table 3 The average shallow ground brackish water quantity in the lower plain of Hebei Province[2] (10^8 m^3)

行政区 District	矿化度 Salt content ($g \cdot L^{-1}$)		总量 Total
	2~3	3~5	
邯郸 Handan	0.34	0.13	0.47
邢台 Xingtai	0.86	0.66	1.52
衡水 Hengshui	2.01	0.75	2.76
沧州 Cangzhou	5.18	1.06	6.24
合计 Total	8.39	2.60	10.99

3.1 优化微咸水灌溉时间

环渤海低平原主要作物冬小麦夏玉米对盐分敏感程度不同，同时两个作物生长的季节降水条件也具有显著差异。冬小麦耐盐能力比夏玉米强，两个作物开始减产的土壤饱和溶液提取液夏的电导率分

别为 4.0 $dS\cdot m^{-1}$和 1.7 $dS\cdot m^{-1}$，减产 50%时分别为 13.0 $dS\cdot m^{-1}$和 5.9 $dS\cdot m^{-1}$[21]。冬小麦生长期间降水少，必须依赖于灌溉取得高产稳产，而冬小麦又是耐盐能力较强作物，可以通过微咸水替代部分淡水资源或者增加 1 次微咸水灌溉，实现冬小麦高产稳产[22]；而夏玉米生育期降水多，多数年份降水能够满足其生长发育要求，可通过充分蓄集和利用雨水资源，满足其生长，并为下季作物冬小麦创造良好的土壤水分条件。但由于两个作物对盐分敏感性不同，一个作物的微咸水灌溉必须考虑其对下茬作物的影响，并考虑长期微咸水灌溉下的土壤盐分平衡问题[23]。

表 4 是在南皮试验站最近 3 年微咸水灌溉冬小麦的试验结果，冬小麦在旱作基础上增加 1 次灌溉，无论用淡水还是用小于 5 $g\cdot L^{-1}$的微咸水，冬小麦增产幅度达 20%~50%，微咸水与淡水增产效果相似；用微咸水替代淡水灌溉后，对冬小麦产量没有产生明显影响。但无论是增加 1 次微咸水灌溉还是用微咸水替代 1 次淡水灌溉的最佳时期是冬小麦拔节前后。多年的研究结果充分证明了微咸水灌溉在冬小麦上可大面积推广应用。由于夏玉米对盐分敏感，冬小麦收获时微咸水灌溉后增加的盐分保留在土壤中，特别是 0~20 cm 玉米苗期根系集中层的土壤盐分含量增加明显。根据测定，0~20 cm 土壤盐分含量平均增加 10%~30%(图 4)，在雨季来临前的夏玉米出苗和苗期，如何消除盐分对玉米的影响是冬小麦夏玉米一年两作微咸水灌溉技术成功应用必须解决的问题。

表 4　微咸水代替一次淡水或者增加一次微咸水灌溉对冬小麦产量的影响(中国科学院南皮生态农业试验站 3 年平均试验结果)

Table 4　The effects of brackish water replacing fresh water to irrigate or adding one more saline irrigation on the yield of winter wheat (three seasons average results in Nanpi Eco-Agricultural Experimental Station, Chinese Academy of Sciences)

微咸水利用方式 Method of brackish water irrigation	淡水灌溉次数 Fresh water irrigation numbers	微咸水替代淡水灌溉时期 Time of brackish water replacing fresh water irrigation	与完全淡水灌溉产量比较 Yield change compared to entire fresh water irrigation (±%)
替代 1 次淡水 Replacing one fresh irrigation	灌溉 1 次水 One irrigation	拔节期 Jointing stage	3.2
		越冬 Before winter-dormancy	−1.3
	灌溉 2 水 Two irrigations	拔节期 Jointing stage	2.9
		杨花期 Anthesis stage	−4.4
微咸水利用方式 Way of brackish water irrigation	**淡水灌溉情况 Fresh water irrigation**	**增加 1 次微咸水灌溉时期 Timing of adding one brackish water irrigation**	**与完全淡水灌溉产量比较 Yield change compared to entire fresh water irrigation (±%)**
增加 1 次微咸水灌溉 Adding one brackish water irrigation	不灌溉淡水 No fresh water irrigation	拔节期 Jointing stage	31.2
	拔节期淡水灌溉 Fresh water irrigation at jointing	扬花期 Anthesis stage	−0.1
	扬花期淡水灌溉 Fresh water irrigation at anthesis	拔节期 Jointing stage	6.9
	越冬期淡水灌溉 Fresh water irrigation at wintering	拔节期 Jointing stage	6.8

由于冬小麦微咸水灌溉后在土壤中的盐分对夏玉米产生不利影响，只有消减这种不利影响才能成功应用冬小麦夏玉米一年两季微咸水灌溉技术。为了保证夏玉米产量不受到冬小麦微咸水灌溉影响，夏玉米出苗水需要灌溉淡水，灌溉水量要大于 70 mm，可实现对根层土壤淋盐，使根层土壤盐分降低到玉米耐盐阈值以下。或者通过局部灌溉，创造玉米出苗的微域淡化，使玉米出苗水的灌溉用水量降低，随后随着雨季到来实现根层土壤完全脱盐，保证根层土壤不产生盐分积累。玉米出苗水的局部灌溉技术可通过大田微灌技术和沟灌技术等实现。

3.2　通过秸秆还田培肥地力增强土壤对微咸水灌溉缓冲能力

上述结果显示，利用不大于 5 $g\cdot L^{-1}$微咸水在冬小麦需要灌溉关键水的拔节期替代 1 次淡水或者增加 1 次微咸水灌溉，增产节水效果明显，在一定程度上可缓解淡水灌溉资源不足问题，但长期咸水灌溉带来的土壤积盐以及可能导致的作物减产等问题始终是人们关注的重点和难点问题[23−24]。一般研究认为，利用超过一定阈值的微咸水进行灌溉会造成土壤积盐集中，植物过氧化物代谢失衡，光合等生理反应减弱，进而造成作物产量降低[25]。随着现代农业发展，农业生产条件发生了巨大变化，特别是随着农业机械化普及，环渤海低平原小麦玉米种植区已全面实现了秸秆全程全量连年还田，熟化和蓄积雨水土壤耕作技术的发展，使土壤肥力和土壤有机质普遍得到了大幅度提升，土壤对有害离子缓冲能力增强[26−27]，微咸水灌溉对土壤和作物的不利影

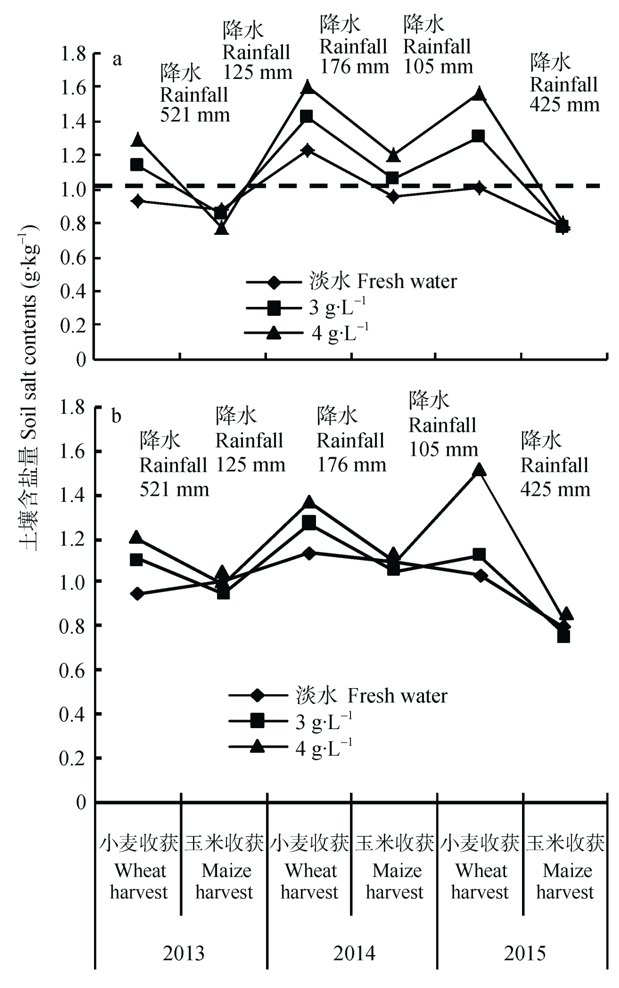


图 4 利用淡水及 3 g·L^{-1}、4 g·L^{-1} 微咸水灌溉冬小麦对土壤表层盐分(0~20 cm)(a)和 1 m 土体盐分的周年影响(b)(2013—2015 年，中国科学院南皮生态农业试验站)

Fig. 4 The effects of using fresh water, brackish water with salt concentrations at 3 g·L^{-1} and 4 g·L^{-1} to irrigate winter wheat on salt contents of the tillage soil layer (0–20 cm) (a) and the top 1 m soil (b) profile (2013-2015, Nanpi Eco-Agricultural Experimental Station, CAS)

响逐年降低，为该区域大面积应用微咸水灌溉提供了基础。

以南皮县为例，1981 年土壤普查结果显示，耕层土壤有机质平均含量 8.9 g·kg^{-1}，而 2015 年多点调查结果显示耕层土壤平均有机质含量已经增加到 15.6 g·kg^{-1}，长期秸秆还田和化肥投入增加对地力提升发挥了重要作物[28]。微咸水灌溉下氯钠离子比例提高、土壤初始入渗率降低，破坏土壤水稳性团聚体，导致土壤物理化学性质恶化，影响土壤养分有效性等，而土壤有机质提升可改善土壤结构，消减微咸水灌溉对土壤理化性质的不利影响。如图 5 是在南皮县域选择典型土壤测定的水稳性团聚体所占比例与土壤有机质含量关系，随着土壤有机质含量提升，土壤水稳性团聚体所占比例直线增加，对维持土壤结构、增加盐分淋洗起到重要作用。

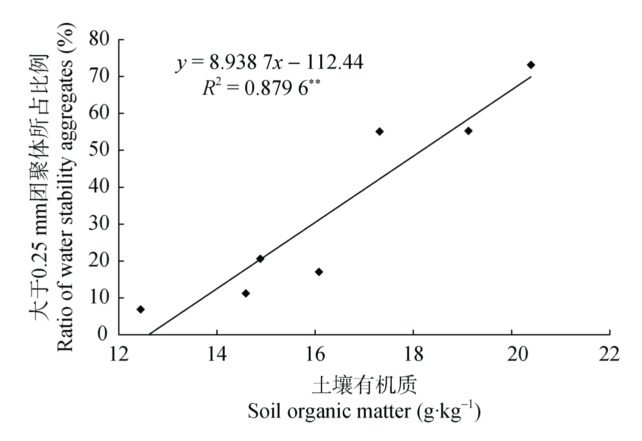


图 5 南皮县典型地块土壤有机质含量与水稳性团聚体(> 0.25 mm)所占比例关系(2015 年测定)

Fig. 5 The relation of soil organic matter content with the ratio of water stability aggregates (>0.25 mm) for some typical fields at Nanpi County (2015)

随着土壤有机质含量增加，对于大田作物可用微咸水灌溉的盐分含量有所提升，为实施微咸水特别是较高矿化度微咸水灌溉提供了有利支撑。如图 6 是总结南皮县域自 20 世纪 80 年代到现在对冬小麦进行的微咸水灌溉试验对产量的影响结果。随着土壤有机质含量增加，4 g·L^{-1} 高矿化度微咸水灌溉增产作用逐渐与 2 g·L^{-1} 的低矿化度微咸水作用一致，特别是当土壤有机质达 18 g·kg^{-1} 时，两者灌溉下冬小麦产量相同，充分说明通过秸秆长期还田提升地力可显著增加土壤对有害离子的缓冲能力。

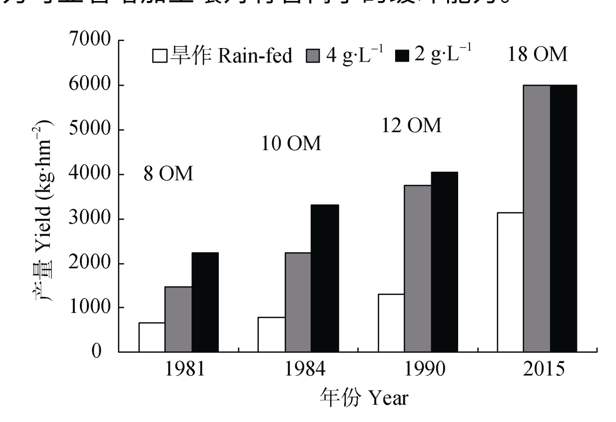


图 6 20 世纪 80 年代到今进行的不同矿化度微咸水灌溉试验对冬小麦增产作用随土壤有机质含量(OM，单位为 g·kg^{-1})的变化

Fig. 6 The changes in responses of winter wheat yield to different brackish water irrigation with the changes in soil organic matter (OM, g·kg^{-1}) since 1980s

很多研究发现土壤有机质增加可提升土壤有益微生物群落、提高植物的 K^+/Na^+比、增加植物渗透调节物质吸收、加快土壤养分循环、增加植物抗氧化酶合成能力等[26,29]，使作物耐受土壤盐分含量阈值提高。图 7 显示增施腐熟有机肥后冬小麦叶片 Na^+/K^+比显著降低，对维持较高矿化度微咸水灌溉下作

物产量不降低有重要意义。但也有研究显示，一些种类有机肥施用反而会加重土壤盐分对作物影响，主要原因是不同种类有机肥盐分含量不同，全盐含量高的有机肥施用反而增加了土壤盐分，在缺水条件下可能会起反作用。例如根据对猪粪和秸秆腐熟有机质盐分含量测定，前者全盐含量是 1.2%，而秸秆腐熟后的有机质全盐含量为 0.4%，家禽粪肥施用增加了土壤盐分含量。Ahmed 等[30]盆栽试验结果显示，在灌溉水含盐量高时(2 dS·m^{-1})施家禽粪肥的处理产量反而比对照低，而施用秸秆转化的有机质的所有灌溉处理下都比不施的高。在土壤含盐量高时家禽粪肥的施用更加重了盐分对作物危害。因此，通过长期秸秆还田增加土壤有机质对增强微咸水灌溉下土壤对有害离子缓冲能力的建设更有意义。

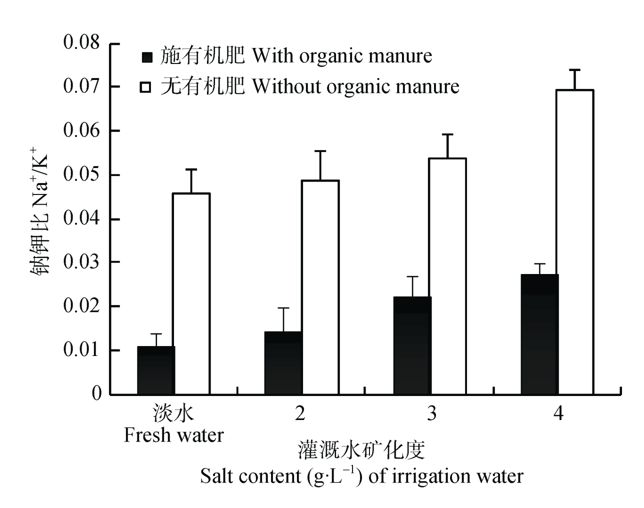


图 7　不同矿化度微咸水灌溉下增施腐熟有机肥对扬花期冬小麦叶片钠钾比的影响(2013—214 年，中国科学院南皮生态农业试验站)

Fig. 7　The effects of manure application on the ratio of Na and K in flag leaves of winter wheat irrigated with different brackish water (2013–2014, Nanpi Eco-Agriculture Experimental Station, Chinese Academy of Sciences)

4　结语

为满足环渤海中低产区粮食增产的水资源需求，缓解当地淡水资源不足，需要安全高效利用微咸水资源。通过“开源”方式增加水资源供应量；通过技术进步提高农田水分利用效率的“节流”方式减少单位粮食生产需要的水资源量。在南皮试验站近几年研究结果表明，冬小麦夏玉米一年两作农田通过选用节水高产品种、配套玉米缩行匀播和冬小麦亏缺灌溉制度，可把现状冬小麦水分生产效率 1.5 kg·m^{-3}、夏玉米 1.8 kg·m^{-3}分别提高到 1.8 kg·m^{-3}和 2.4 kg·m^{-3}的较高水平，在现有粮食生产条件下，可实现的节水潜力达 20~24 亿 m^3。同时，随着秸秆还田措施长期应用，土壤有机质含量不断提升，微咸水替代淡水灌溉对作物和土壤不利影响降低，为微咸水长期安全利用创造了条件，微咸水安全高效利用可为当地农田提供近每公顷 750 m^3 的灌溉水源。

根据上述研究结果，环渤海粮食生产过程中涉及地下咸水、地下淡水、雨水和地表水等多种水源，依据区域水质水量周年变化规律和作物需水耐盐特征，建立作物适水灌溉制度，即充分利用外来客水和雨季坑塘积蓄的地表水，进行冬小麦储水灌溉和夏玉米应急抗旱灌溉，减少对地下淡水依赖；同时，根据冬小麦夏玉米不同作物耐盐需水特征，进行冬小麦春季微咸水补灌，替代淡水资源，实现多水源协同高效利用，构建渤海粮仓建设的水资源保障技术体系。

参考文献　References

[1] de Fraiture C, Wichelns D. Satisfying future water demands for agriculture[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(4): 502–511

[2] 郑连生. 广义水资源与适水发展[M]. 北京：中国水利水电出版社, 2009
Zheng L S. Water Resources and Development Based on the Capacity of the Water[M]. Beijing: H&E Publishing House, 2009

[3] Jensen C R, Ørum J E, Pedersen S M, et al. A short overview of measures for securing water resources for irrigated crop production[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2014, 200(5): 333–343

[4] Zwart S J, Bastiaanssen W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize[J]. Agricultural Water Management, 2004, 69(2): 115–133

[5] Shearman V J, Sylvester-Bradley R, Scott P K, et al. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK[J]. Crop Science Society of America, 2005, 45(1): 175–185

[6] Siddique K H M, Tennant D, Perry M W, et al. Water use and water use efficiency of old and modern wheat cultivars in a Mediterranean-type environment[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1990, 41(3): 431–447

[7] 张喜英. 提高农田水分利用效率的调控机制[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 80−87
Zhang X Y. Regulating mechanisms for improving farmland water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 80−87

[8] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors[J]. Field Crops Research, 2009, 114(1): 75–83

[9] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Water use efficiency and associated traits in winter wheat cultivars in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8):

1117–1125
[10] Zhang X Y, Wang S F, Sun H Y, et al. Contribution of cultivar, fertilizer and weather to yield variation of winter wheat over three decades: A case study in the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 50: 52–59
[11] Fereres E, Soriano M A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(2): 147–159
[12] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. Irrigation Science, 2008, 27(1): 1–10
[13] Zhang X Y, Wang Y Z, Sun H Y, et al. Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water supply[J]. Irrigation Science, 2013, 31(5): 1103–1112
[14] 邵立威, 王艳哲, 苗文芳, 等. 品种与密度对华北平原夏玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(3): 182–188
Shao L W, Wang Y Z, Miao W F, et al. Effect of cultivar and plant density on summer maize grain yield and water use efficiency in North China Plain[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, 26(3): 182–188
[15] Testa G, Reyneri A, Blandino M. Maize grain yield enhancement through high plant density cultivation with different inter-row and intra-row spacings[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 72: 28–37
[16] Deng X P, Shan L, Zhang H P, et al. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China[C]//Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia: ICSC, 2004
[17] Liu X W, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2015, 154: 59–67
[18] Zhang X Y, Chen S Y, Pei D, et al. Evapotranspiration, yield and crop coefficient of irrigated maize under straw mulch[J]. Pedosphere, 2005, 15(5): 576–584
[19] Chen S Y, Zhang X Y, Pei D, et al. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: Field experiments on the North China Plain[J]. Annals of Applied Biology, 2007, 150(3): 261–268
[20] Chauhan C P S, Singh R B, Gupta S K. Supplemental irrigation of wheat with saline water[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(3): 253–258
[21] Maas E V. Testing crops for salinity tolerance[M]//Maranville J W, BaIigar B V, Duncan R R, et al. Proceedings of Workshop on Adaptation of Plants to Soil Stresses. Lincoln, NE: University of Nebraska, 1993: 234–247
[22] 陈素英, 张喜英, 邵立威, 等. 微咸水非充分灌溉对冬小麦生长发育及夏玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 579–585
Chen S Y, Zhang X Y, Shao L W, et al. Effect of deficit irrigation with brackish water on growth and yield of winter wheat and summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 579−585
[23] Muscolo A, Mallamaci C, Panuccio M R, et al. Effect of long-term irrigation water salinity on soil properties and microbial biomass[J]. Ecological Questions, 2011, 14: 77–79
[24] Wang Q M, Huo Z L, Zhang L D, et al. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 125–138
[25] Hillel D, Braimoh A K, Vlek P L G. Soil degradation under irrigation[M]//Braimoh A K, Vlek P L G. Land Use and Soil Resources. Netherlands: Springer, 2008: 101–119
[26] Lax A, Díaz E, Castillo V, et al. Reclamation of physical and chemical properties of a salinized soil by organic amendment[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1994, 8(1): 9–17
[27] Choudhary O P, Kaur G, Benbi D K. Influence of long-term sodic-water irrigation, gypsum, and organic amendments on soil properties and nitrogen mineralization kinetics under rice-wheat system[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(19/20): 2717–2731
[28] Diacono M, Montemurro F. Effectiveness of organic wastes as fertilizers and amendments in salt-affected soils[J]. Agriculture, 2015, 5(2): 221–230
[29] Aragüés R, Medina E T, Clavería I. Effectiveness of inorganic and organic mulching for soil salinity and sodicity control in a grapevine orchard drip-irrigated with moderately saline waters[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014, 12(2): 501–508
[30] Ahmed B A O, Inoue M, Moritani S. Effect of saline water irrigation and manure application on the available water content, soil salinity, and growth of wheat[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(1): 165–170